

В.Н. Небезин, А.В. Бусыгина

## Обзор способов определения химических и биологических компонент в жидкостях при помощи СВЧ-устройств

Выполнен обзор способов определения химического состава и обнаружения биологической активности микроорганизмов в жидкостях при помощи СВЧ-устройств. Использование устройств позволяет определять наличие и концентрацию известных химических соединений в жидкостях. Показана возможность оценки изменений концентрации микроорганизмов в жидкостях.

**Ключевые слова:** СВЧ-устройство, жидкость, химическое соединение, биологический объект.

В современном мире наблюдается спрос на простые и дешевые способы контроля различных процессов в пищевой и фармацевтической промышленности, в которых требуется контроль за физиологическими процессами, протекающими в биологических жидкостях в режиме реального времени. Наиболее оптимальными являются способы, обладающие высокой проникающей способностью и позволяющие многоразовое использование, а также не требующие высокой квалификации обслуживающего персонала. Такими качествами обладают радиочастотные методы [1]. Так, применение СВЧ-устройств при исследовании химически сложных и многокомпонентных жидкостей, таких как пищевые продукты, биологические и фармацевтические жидкости, позволяет оперативно оценивать изменения в их электрофизических свойствах.

В медицине широко применяются различные типы жидких лекарственных растворов, состоящих преимущественно из воды. Эти растворы характеризуются высокими значениями диэлектрической проницаемости и невысокой электропроводностью. Одним из способов определения веществ в таких растворах является регистрация изменений в резонансной частоте резонатора, в который они помещены [2, 3]. Эти устройства позволяют автоматизировать процедуры контроля вводимых жидкостей медицинскими аппаратами в биологические объекты. Помимо прочего, СВЧ-устройства обладают достоинствами, необходимыми для исследования различных типов жидких продуктов питания, что делает их привлекательными для повседневного использования [1, 4, 5]. Это обусловлено простотой их механической конструкции и широким диапазоном настроек, а также возможностью фокусировки электрического поля на исследуемом объекте.

Цель работы – выполнить обзор способов определения химических и органических компонент в жидкостях при помощи СВЧ-устройств.

### Обнаружение биологической активности в жидкостях

Химически активные вещества, такие как антибиотики, оказывают непосредственное влияние на физиологические процессы, протекающие в организме, снижая жизнеспособность и останавливая биохимическую активность бактериальных клеток. Выявление антибиотиков в жидкостях является слож-

ной задачей из-за их большого количества и разнообразия. Для этих целей предложено устройство, состоящее из прямоугольного резонатора, ограниченного пластиной из ниобата лития, покрытой пленкой из пористого полистирола, на которой расположена колония бактериальных клеток (рис. 1) [3]. Возбуждение резонатора осуществляется через коаксиально-волноводный переход.

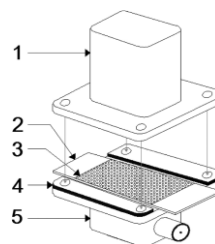


Рис. 1. Устройство обнаружения антибиотика в жидкости: 1 – пластина из ниобата лития; 2 – чувствительный слой; 3 – бактериальный слой; 4 – направляющие для пластины; 5 – волноводно-коаксиальный переход [3]

Для обеспечения постоянных условий эксперимента клетки иммобилизуются (сохраняют свою жизнеспособность в течение длительного времени при постоянной температуре). При добавлении биологических объектов на пленку изменяются характеристики резонатора, в частности, модуль коэффициента отражения  $|S_{11}|$  (рис. 2). Поэтому сначала используется полистирольная пленка со стерильной жидкостью для настройки работы устройства. Из рис. 2 видно, что со временем происходят процессы, связанные с изменением среды обитания и клеточным ответом на внешнее воздействие. Добавление водного раствора ампициллина к клеточной колонии приводит к изменению активности клеток и тем самым электрофизических свойств жидкости. Это выражается в значительном изменении  $|S_{11}|$  в зависимости от разной концентрации химически активного вещества (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что при увеличении концентрации антибиотика среда становится менее комфортна для жизнедеятельности микроорганизмов. Поэтому концентрация антибиотика непосредственно влияет на жизнеспособность микроорганизмов.

Характер происхождения биологических жидкостей влияет на их химические и электрофизические свойства, что осложняет определение в них различных микроорганизмов. Поэтому разработка

устройств, позволяющих оперативно определять живые объекты во всевозможных жидкостях при их различных концентрациях, важна в медицине и пищевой промышленности. Так, известно устройство обнаружения изменения концентрации бактерий в жидких средах с различным рН при помощи анализа резонансных характеристик микроволновой системы [2].

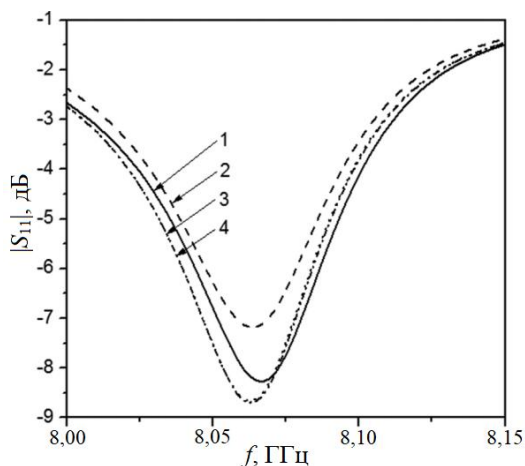


Рис. 2. Частотная зависимость  $|S_{11}|$  резонатора с полистирольной пленкой (1), содержащей микробные клетки, после 10 (2), 20 (3), и 30 (4) мин [3]

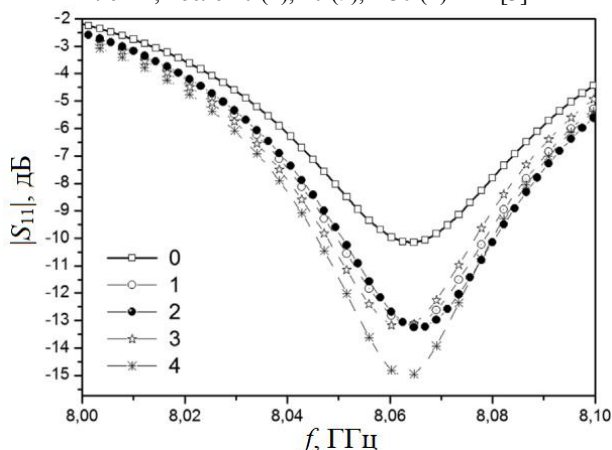


Рис. 3. Частотные зависимости  $|S_{11}|$  резонатора до (0) и после добавления антибиотика в количестве 4 (1), 10 (2), 25 (3) и 50 (4) мкг/мл [3]

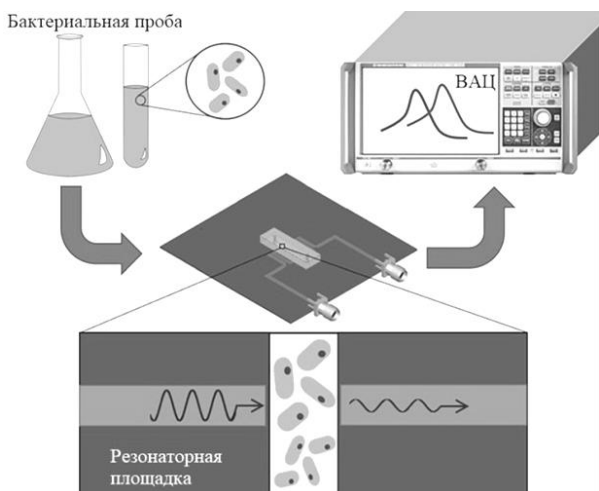


Рис. 4. Схема обнаружения концентрации бактерий в жидкости [2]

Процесс обнаружения роста концентрации микроорганизмов в жидкостях при помощи устройства, подключенного к векторному анализатору цепей, схематично показан на рис. 4.

Рост численности бактерий сопровождается изменением электрофизических параметров жидкости (рис. 5). Из рис. 5 видно, что рост числа бактерий сопровождается изменением значений амплитуды тока ( $I_p$ ) и частоты ( $f_p$ ) резонанса, поэтому возможна регистрация пораженных микроорганизмами жидкостей.

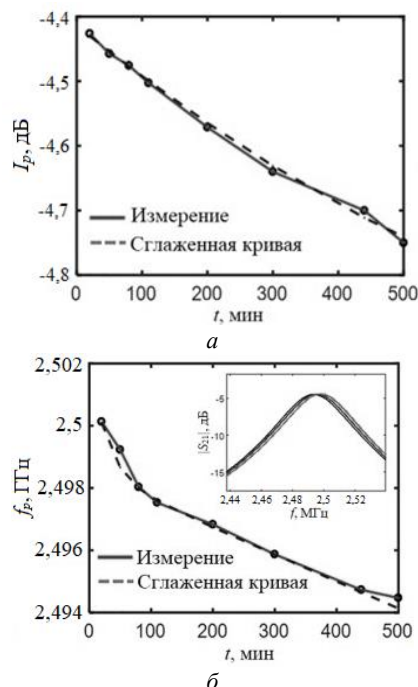


Рис. 5. Изменение резонансного тока (а) и частоты (б) системы при увеличении времени эксперимента [2]

### Коаксиальная ячейка

Для исследования жидких продуктов питания предложен способ, заключающийся в мониторинге их проводимости [1]. Устройство представляет собой коаксиальную ячейку, внутри которой находится исследуемая жидкость (рис. 6).

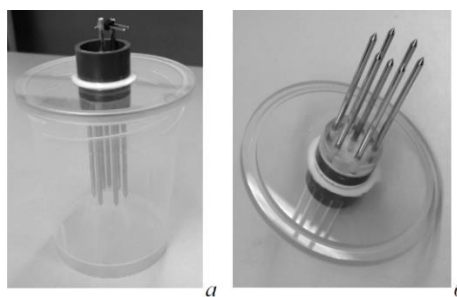


Рис. 6. Экспериментальная установка: общий вид (а) и измерительный датчик (б) [1]

Обработка результатов осуществляется при помощи эквивалентной электрической схемы измерительной ячейки и жидкости. В ней учитываются различные электрофизические параметры жидкости как чистой, так и с различными примесями (рис. 7). Из рис. 7 видно, что облепиховый напиток является более кислой средой по сравнению с остальными жид-

костями, а наименее кислотной – сливовый напиток. Из этого можно делать вывод, что с использованием устройства можно определять как кислотность среды, так и различные химические добавки в ней.

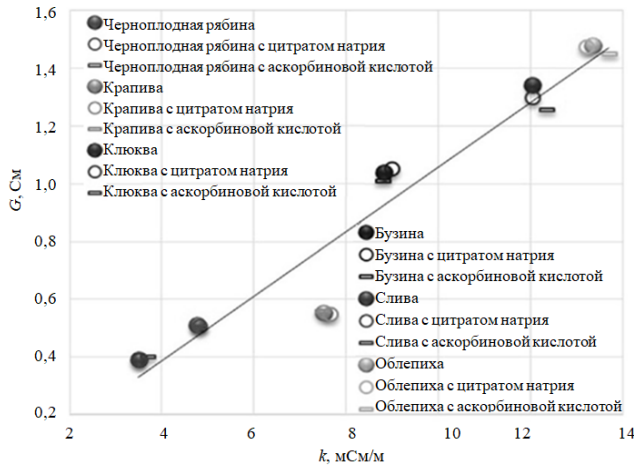


Рис. 7. Зависимость электропроводности жидкости от удельной проводимости ее компонент [1]

### Коаксиальный зонд

Поскольку подделка масла приносит экономический ущерб их производителям, то возникает необходимость в определении заявленного химического состава. В зависимости от происхождения химический состав масла отличается из-за растворенных в нем органических компонент [6]. В работе [7] предложен коаксиальный зонд, используемый для выявления наличия посторонних примесей в масле, основанный на микроволновой спектроскопии (рис. 8).

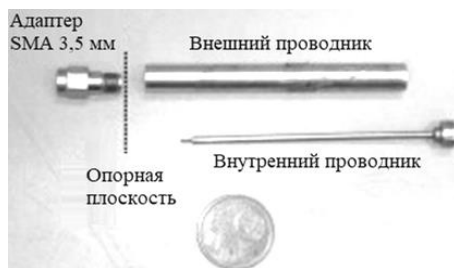


Рис. 8. Конфигурация коаксиального зонда [7]

Зонд представляет собой линию передачи, предназначенную для определения частоты релаксации ( $f_p$ ) молекул растительного масла в смесях, содержащих его (таблица).

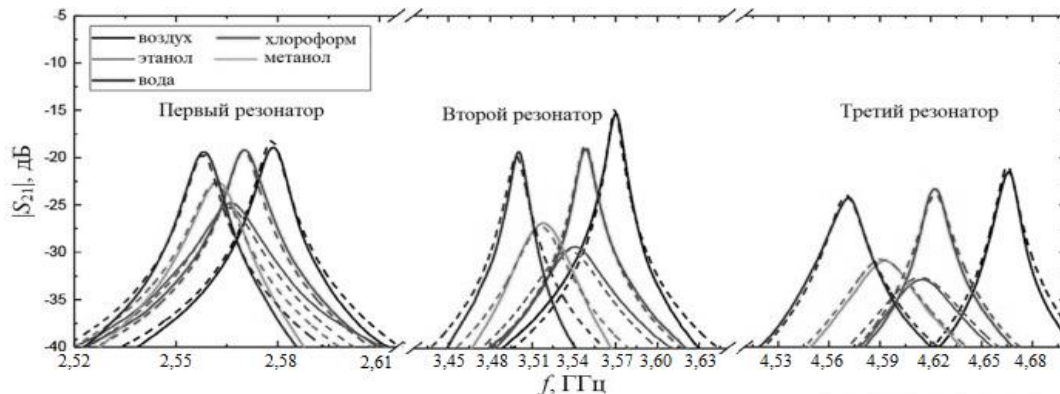


Рис. 10. Частотные зависимости  $|S_{21}|$  при пустой трубке и с жидкостями внутри неё для 25 °C [4]

### Частота релаксации молекул масла в зависимости от доли в нем подсолнечного масла

Масло	Доля подсолнечного масла, %	$f_p$ , МГц
Оливковое	0	245
Смесь 1	10	250
Смесь 2	20	257
Смесь 3	30	259
Смесь 4	40	263
Подсолнечное	100	295

Из таблицы видно, что с повышением процентного содержания подсолнечного масла в смесях происходит увеличение частоты релаксации. Поэтому, зная электрофизические параметры проверяемого продукта, можно определять наличие в нем примеси подсолнечного масла.

### Микрополосковый резонатор

В качестве компактных датчиков для определения различных типов и химических свойств жидкостей перспективно использование микрополосковых резонаторов, поскольку их параметры изменяются при контакте с различными типами диэлектриков. Так, резонансная частота резонатора зависит как от его размеров, так и от диэлектрической проницаемости его подложки. Поскольку жидкости обладают различными электрофизическими свойствами, то при их смене происходит изменение характеристик резонатора [4]. Устройство состоит из трех параллельных резонаторов, а его модель схематично показана на рис. 9.

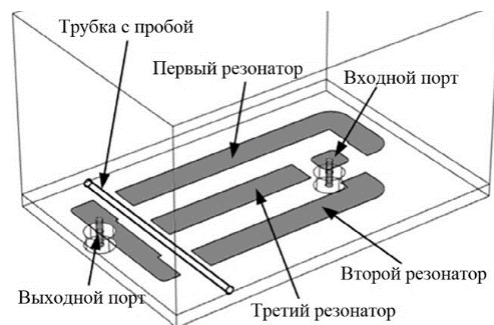


Рис. 9. Модель устройства на основе трех микрополосковых резонаторов [4]

Для исследования жидкостей применяется специальная трубка. В ходе эксперимента измеряются модули коэффициентов передачи  $|S_{21}|$  всех трех резонаторов при наличии в трубке жидкости (рис. 10).

Из рис. 10 видно, что добавление жидкости в трубку приводит к изменению частот резонаторов, а также значений  $|S_{21}|$ , что обусловлено изменением диэлектрической проницаемости жидкости (рис. 11, 12).

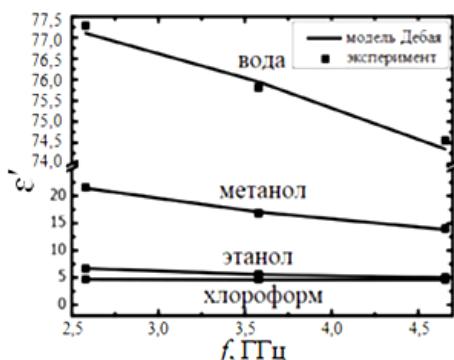


Рис. 11. Частотная зависимость реальной части диэлектрической проницаемости жидкостей [4]

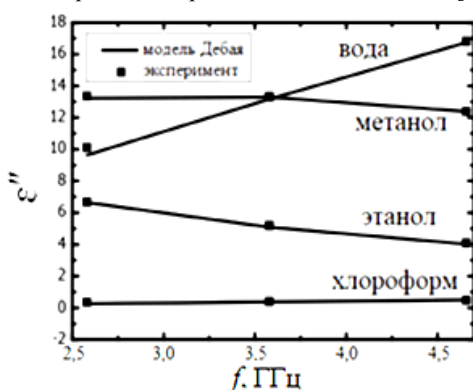


Рис. 12. Частотная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости жидкостей [4]

### Микроволновый определитель глюкозы

В работе [9] представлено устройство для определения концентрации глюкозы в крови. Модель устройства схематично показана на рис. 13, а пример его использования – на рис. 14. Из рис. 14 видно, что изменение концентрации глюкозы приводит к сдвигу резонанса  $|S_{11}|$ .

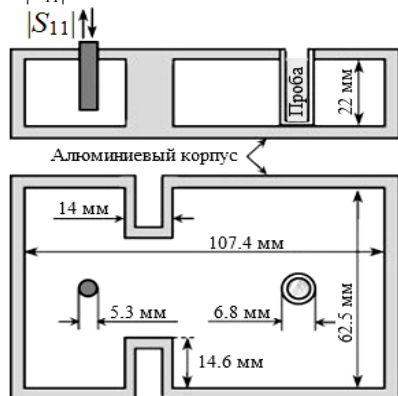


Рис. 13. Модель микроволнового устройства для определения уровня глюкозы в крови [8]

### Выводы

В работе рассмотрены различные способы определения химических и биологических компонент в жидкости. Показана применимость устройств для регистрации химического состава и выявления наличия в среде микроорганизмов.

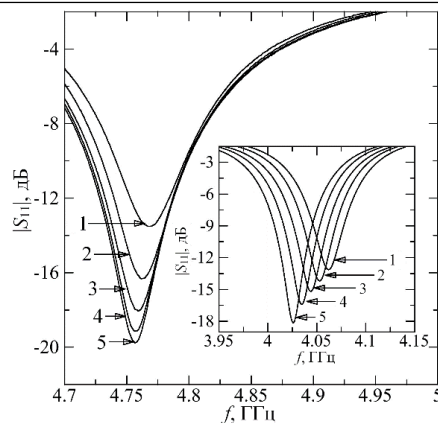


Рис. 14. Частотная зависимость  $|S_{11}|$  устройства для образцов крови свиней с концентрацией глюкозы: 1 – 1,5; 2 – 25; 3 – 3,5; 4 – 4,5; 5 – 5,5 мг/мл [9]

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2020-0041.

### Литература

1. Electrical impedance measurements for detecting artificial chemical additives in liquid food products / A. Nakonieczna, B. Paszkowski, A. Wilczek, A. Szyplowska, W. Skierucha // Food control. – 2016. – Vol. 66. – P. 116–129.
2. Sensitive, real-time and non-intrusive detection of concentration and growth of pathogenic bacteria using microfluidic-microwave ring resonator biosensor / R. Narang, S. Mohammadi, M.M. Ashani, H. Sadabadi, H. Hejazi, M.H. Zarifi, A. Sanati-Nezhad // Scientific reports. – 2018. – Vol. 8, No. 1. – 10 p.
3. Sensor for ampicillin based on a microwave electrodynamic resonator / O.I. Guliy, B.D. Zaitsev, A.V. Smirnov, O.A. Karavaeva, I.A. Borodina // Biosensors and bioelectronics. – 2019. – Vol. 130. – P. 95–102.
4. Abduljabar A.A. Multi-resonators, microwave microfluidic sensor for liquid characterization / A.A. Abduljabar, H. Hamzah, A. Porch // Microwave and optical technology letters – 2020. – Vol. 63, No. 4. – P. 1042–1047.
5. Muchammad A.A. Liquid impedance analyser for glucose concentration in water using resonance model / A.A. Muchammad, R. Sugeng, P.S. Setyawan // Microwave and optical technology letters. – 2020. – P. 1–6.
6. Lizhi H. Dielectric properties of edible oils and fatty acids as a function of frequency, temperature, moisture and composition / H. Lizhi, K. Toyoda, I. Ihara // Journal of food engineering. – 2008. – Vol. 88, No. 2. – P. 151–158.
7. Quality and anti-adulteration control of vegetable oils through microwave dielectric spectroscopy / A. Cataldo, E. Piuze, G. Cannazza, E. De Benedetto, L. Tarricone // Measurement. – 2010. – Vol. 43, No. 8. – P. 1031–1039.
8. Noninvasive in vitro measurement of pig-blood d-glucose by using a microwave cavity sensor / K. Seungwan, M. Harutyun, K. Jongchel, B. Arsen, L. Jung-Ha, E. Lkhamsuren, F. Barry, L. Kiejin // Diabetes research and clinical practice. – 2012. – Vol. 96, No. 3. – P. 379–384.

### Невежин Виталий Николаевич

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-2257-7690  
Эл. почта: vitalayzerman@mail.ru

### Бусыгина Анна Владимировна

Ст. преп. каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-2150-5396  
Эл. почта: bav-tusur@mail.ru